

文章编号:1000-6893(2008)06-1592-06

飞行器红外隐身效能工程评价方法

韦第升, 王小群, 杜善义

(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100191)

Engineering Evaluation Method for Infrared Camouflage Efficiency of Aircraft

Wei Disheng, Wang Xiaoqun, Du Shanyi

(School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and
Astronautics, Beijing 100191, China)

摘 要: 针对飞行器的红外隐身问题, 推导出红外辐射对比度与作用距离的理论关系, 采用指数拟合获得大气透过率与作用距离的近似关系表达式, 简化了对作用距离的计算, 并通过实际算例考察了目标表面温度、目标发射率和飞行速度对红外辐射对比度及作用距离的影响。结果表明: 对比度和作用距离随目标表面温度、发射率及飞行速度的下降趋势基本一致; 在一定条件下, 对比度可代替作用距离作为评价目标红外隐身效果的简单、快速的参数, 对比度越小目标的红外隐身效果越好。对比度的计算快速、准确、灵活性强和适用范围广, 为今后进一步对飞行器的红外隐身研究提供一定的理论参考。

关键词: 红外隐身; 评价; 飞行器; 红外辐射对比度; 作用距离

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A

Abstract: Aiming at the issue of aircraft infrared camouflage, the relationship between the infrared contrast and the operating range of an infrared system was deduced, an approximate expression for the relation between the atmospheric transmittance and operating range was obtained through exponential fitting, and a simplified method of calculating the operating range was developed. The influences of major factors on infrared contrast and operating range, such as the target external temperature, the infra-red (IR) emissivity of the target, and the flight speed, were also studied by theoretical analysis. The results show that infrared contrast and operating range exhibit basically the same trend of being lowered by decreasing the target temperature, emissivity, and flight speed. Under certain conditions, infrared contrast could take the place of operating range to serve as a convenient parameter for predicting the infrared camouflage effect of an aircraft. The infrared camouflage of an aircraft would have better effect with smaller infrared contrast. The rapidity, accuracy, flexibility and large application scope of infrared contrast calculation provide certain theoretical reference for further study on infrared camouflage of aircraft.

Key words: infra-red camouflage; evaluation; aircraft; infrared contrast; operating range

红外探测技术的发展使武器装备的生存能力受到严重的挑战。为对抗各种红外探测器(或系统)的探测、识别和跟踪, 世界上几个主要大国都在努力发展反红外探测技术——红外隐身技术。红外隐身效能评价成为红外隐身技术发展与应用的研究热点^[1]。红外隐身效能评价是通过对比实施隐身技术前后目标的红外辐射特性, 分析和判断隐身技术的具体实施效果。通过红外隐身效能评价, 可以更有效地研究影响目标红外辐射特性的各种因素, 进而指导红外隐身方案, 这对提高现有武器装备的生存力和战斗力, 使其满足现代战争的需求具有非常重要的意义^[2]。

热成像系统的作用距离是指在一定的大气条件下, 系统对某一实际目标可能发现、识别和认清的最远距离, 是描述武器装备隐身效果的一个重要指标。很多学者已经建立了作用距离的计算模型: 王刚等^[3]根据系统最小可分辨对比度与目标及背景的表现对比度的关系建立了作用距离计算模型; 武振波等^[4]利用作用距离与目标及背景的红外辐射强度关系推导出作用距离的计算公式; 薛晶晶等^[5]采用隐身效率(实施隐身前后的作用距离之差与隐身前作用距离的比值)作为衡量隐身效果的参数, 也需先计算出作用距离。由于这些模型和公式中大气透过率参数不易确定, 作用距离的求解一般采用线性插值和反复迭代方法。陈翊等^[6]采用辐射对比度描述地面目标的红外隐身

效果,并分析了目标发射率、目标与背景的温差对辐射对比度的影响,但没有考虑作用距离的影响。

本文推导出对比度和作用距离的理论关系,提出一种计算作用距离的简便方法,并通过实际算例考察飞行器目标红外辐射特性的影响因素(目标表面温度、目标发射率和飞行速度)对辐射对比度和作用距离的影响;对于大气透过率未知或不易确定的情况,可采用对比度作为预报目标红外隐身效果的参数。对比度的计算快速、准确、灵活性强和适用范围广,为今后进一步对飞行器的红外隐身研究提供一定的理论参考。

1 飞行器红外隐身工程评价模型

当红外探测系统探测飞机时,由于距离较远,飞机没有完全充满探测器视场,可视为点源探测,所以下面将飞机视为点源目标进行讨论。

1.1 红外辐射对比度

红外制导和红外成像制导武器对目标的发现、识别和跟踪主要依据目标与背景的红外辐射对比特性及其成像特征来实现。为描述目标与背景辐射的差别,引入辐射对比度这个参数。对于点源目标,辐射对比度定义如下^[7]

$$C = \frac{I_T - I_B}{I_B} \quad (1)$$

式中: C 为目标与背景的对比度; I_T, I_B 分别为目标和背景的红外辐射强度。

假设飞机蒙皮和天空背景为理想漫射特性的灰体,忽略蒙皮对环境的反射等因素,只考虑蒙皮辐射在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段的影响^[8](蒙皮的面积比尾喷口等部位的面积大许多倍,而且蒙皮辐射的峰值波长处于 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段,所以蒙皮辐射在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段占有非常重要的地位),则目标和背景的辐射强度分别为^[9]

$$I_T = \frac{\epsilon_T \sigma T_T^4}{\pi} \eta'_{\lambda_1-\lambda_2} A_p \quad (2)$$

$$I_B = \frac{\epsilon_B \sigma T_B^4}{\pi} \eta''_{\lambda_1-\lambda_2} A_p \quad (3)$$

式中: σ 为 Stefan-Boltzmann 常数; ϵ_T 为目标发射率; T_T 为目标表面温度; $\eta'_{\lambda_1-\lambda_2}$ 为目标在 $\lambda_1 - \lambda_2$ 波段范围内的辐射能量百分比; ϵ_B 为背景发射率; T_B 为环境温度; $\eta''_{\lambda_1-\lambda_2}$ 为背景在 $\lambda_1 - \lambda_2$ 波段范围内的辐射能量百分比; A_p 为机身蒙皮在观测方向上的有效辐射面积。

$$\eta'_{\lambda_1-\lambda_2} = F(\lambda_2 T_T) - F(\lambda_1 T_T) \quad (4)$$

$$\eta''_{\lambda_1-\lambda_2} = F(\lambda_2 T_B) - F(\lambda_1 T_B) \quad (5)$$

式中: $F(\lambda T)$ 为黑体辐射函数,可查表得到^[8]。

如图 1 所示,将飞机简化为一个四面体^[10], A 代表机头位置; l, w, h 分别为飞机的长度、宽度和高度。对于前视

$$A_p = \frac{1}{2} wh \quad (6)$$

将式(2)、式(3)和式(4)、式(5)代入式(1)中,得

$$C = \frac{\epsilon_T T_T^4 [F(\lambda_2 T_T) - F(\lambda_1 T_T)]}{\epsilon_B T_B^4 [F(\lambda_2 T_B) - F(\lambda_1 T_B)]} - 1 \quad (7)$$

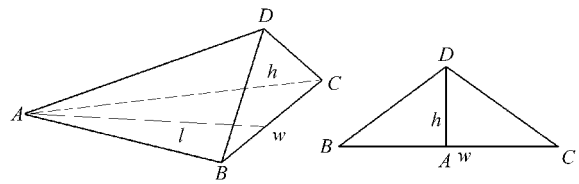


图 1 飞机简化三维模型图

Fig. 1 Simplified three-dimensional model of aircraft

1.2 作用距离

图 2 为红外探测系统对飞机探测的简易图,其作用距离方程为^[11]

$$R = \left[I_T \cdot \frac{\pi \tau(R) \tau_0 D_0 D^*}{4F \cdot \text{SNR}(\omega \Delta f)^{1/2}} \right]^{1/2} \quad (8)$$

式中: R 为探测系统的作用距离; $\tau(R)$ 为大气对红外辐射的透过率,与作用距离有关; τ_0 为光学系统透过率; D_0 为系统通光孔直径; D^* 为探测器归一化探测率; F 为焦距; SNR 为系统信噪比; ω 为瞬时视场角; Δf 为等效噪声带宽。

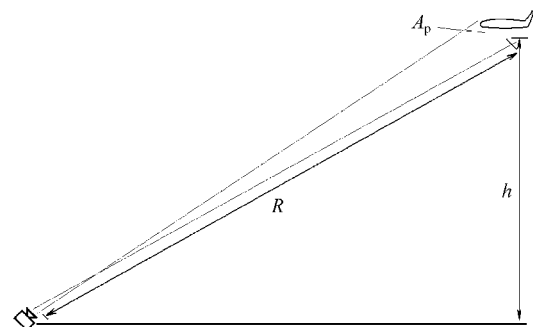


图 2 红外探测系统探测飞机示意图

Fig. 2 Schematic of infrared detection system detecting aircraft

考虑到探测器距离飞机较远,飞机并没有完全充满探测器视场,仍有一部分背景辐射入射到探测器靶面上,此时对作用距离的计算应该减去这部分背景辐射^[12]。

$$R = \left[(I_T - I_B) \cdot \frac{\pi\tau(R)\tau_0 D_0 D^*}{4F \cdot \text{SNR}(\omega\Delta f)^{1/2}} \right]^{1/2} \quad (9)$$

结合式(1)和式(9),可得到作用距离与对比度的关系式

$$R = \left[CI_B \frac{\pi\tau(R)\tau_0 D_0 D^*}{4F \cdot \text{SNR}(\omega \cdot \Delta f)^{1/2}} \right]^{1/2} = \frac{K [CI_B \tau(R)]^{1/2}}{K} \quad (10)$$

式中: K 只与探测系统自身性能参数有关,

$$K = \left[\frac{\pi\tau_0 D_0 D^*}{4F \cdot \text{SNR}(\omega\Delta f)^{1/2}} \right]^{1/2} \quad (11)$$

2 红外隐身工程评价模型的计算方法

2.1 红外辐射对比度模型参数确定

由式(7)可以看出,目标与背景的红外辐射对比度无需校正,因为它是以目标与背景的热信号反差为基础来识别目标的,而且没有涉及复杂的大气透过率和热像仪等因素,所以采用辐射对比度作为一种快速简单表征红外隐身效能的参数是很好的选择。

不同材料在不同波长及温度范围内,发射率随温度的变化规律不同^[13],但蒙皮温度变化在几十度的范围内,对发射率的影响不大,故在计算时认为蒙皮发射率不随温度变化。背景辐射用处于环境大气温度的黑体辐射强度给出^[7]。

由于将飞机视为点源目标,计算中以机翼前缘驻点温度作为目标温度 T_T ,公式如下^[14]

$$T_T = T_B \left[1 + k \left(\frac{\gamma - 1}{2} \right) Ma^2 \right] \quad (12)$$

式中: T_B 为一定高度处的大气环境温度; k 为温度恢复系数(层流为 0.82,紊流为 0.87); γ 为空气定压定容热容量之比,通常取 1.4; Ma 为飞行速度与当地声速之比。

2.2 作用距离的简便计算方法

直接求解热像系统的作用距离比较困难,这主要是因为作用距离方程中含有变量大气透过率 $\tau(R)$,而 $\tau(R)$ 的大小又与作用距离有关,使得式(9)成为一个隐含方程。传统的解法都是采用迭代法求解,计算过程较为繁琐且工作量大。本文提出利用一定条件下不同距离对应的大气透过率数据,采用数据拟合获得 $\tau(R)$ 与 R 的近似关系表达式,然后代入作用距离计算公式,可使 R 的求解变得快速、简单和准确。

由于大气透过率随距离存在指数衰减^[15],故可以根据大气透过率-距离实验数据^[13]或 LOWTRAN 软件计算结果^[10]拟合出透过率随距离变化的指数形式表达式。

3 红外隐身效果分析算例

以国外某型战斗机为具体算例^[10],算例中该机长 $l=15.03$ m,翼展 $w=9.45$ m,机高 $h=5.09$ m,将上述数值代入式(6),得机身蒙皮有效辐射面积 $A_p=24.05$ m²。目标发射率 ϵ_T 取 0.5~0.9。

背景环境假设为中纬度夏季 10 km 高空,由文献^[7]查得环境温度 $T_B=235.3$ K;背景发射率 $\epsilon_B=1$ 。将 T_B 和马赫数代入式(12)即可得不同飞行速度下的目标温度 T_T 。

红外探测系统选用 Catherine-GP 热像仪,其中探测器是法国 SOFRADIR 公司生产的 288×4 元的 HgCdTe 探测器,其主要的性能参数如下:工作波段 $8 \sim 14$ μm ;瞬时视场角 $\omega=3^\circ \times 3^\circ$;通光孔直径 $D_0=125$ mm;探测器归一化探测率 $D^*=2.3 \times 10^{11}$ cm \cdot W⁻¹ \cdot Hz^{-1/2};系统的信噪比 $\text{SNR}=6$;光学系统透过率 $\tau_0=0.8$;等效噪声带宽 $\Delta f=2 \times 10^3$;焦比 $F=1.7$ 。将上述数值代入式(11),得 $K=2\,749.8$ m \cdot (W/sr)^{-1/2}。

根据中纬度夏季乡村气溶胶能见度为 23 km 时计算得到的大气透过率数据^[3](见表 1),利用 MATLAB 软件进行曲线拟合,得到该条件下大气透过率与作用距离关系的拟合曲线及相关公式,如图 3 和式(13)所示。

表 1 中纬度夏季乡村气溶胶条件下不同距离对应的 8~14 μm 大气透过率值

Table 1 Atmospheric transmittance for different ranges in rural aerosol model (VIS=23 km, 8~14 μm)

距离/km	0	1	2	5
大气透过率	1.00	0.88	0.81	0.66
距离/km	10	20	50	100
大气透过率	0.49	0.28	0.07	0.01

$$\tau(R) = 0.6367e^{0.3755-0.0702R} + 0.0294 \quad (13)$$

将式(13)代入式(10),得

$$R = K [CI_B \cdot (0.6367e^{0.3755-0.0702R} + 0.0294)]^{1/2} \quad (14)$$

式(14)难以得到解析解,可以通过 MATLAB 或其他软件求得作用距离的数值解。

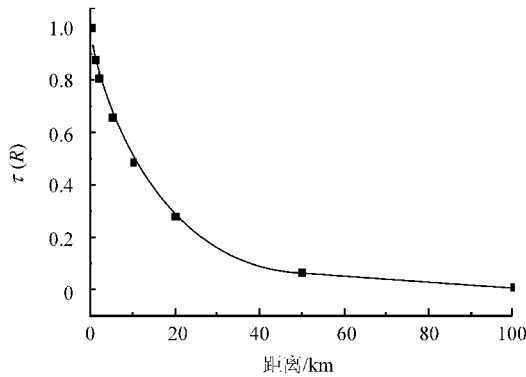


图 3 乡村气溶胶条件下大气透过率拟合曲线
Fig. 3 Curve of atmospheric transmittance for different ranges in rural aerosol model

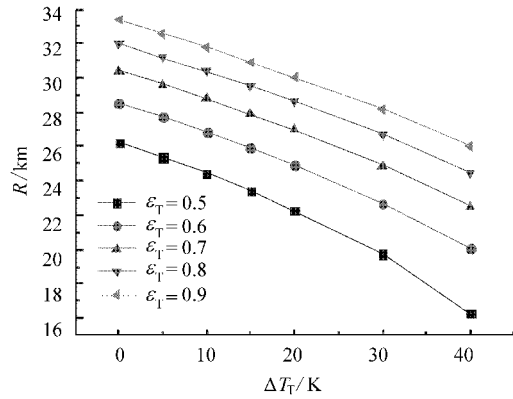


图 5 不同 ϵ_T 下 R 随 ΔT_T 变化曲线
Fig. 5 Relationship between operating range and ΔT_T under different ϵ_T

3.1 目标温度对红外隐身效果的影响

为了分析目标表面温度对红外隐身效果的影响,由式(7)计算得到 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段目标与背景对比度 C 随目标降温程度 ΔT_T 的变化曲线,如图 4 所示;由式(14)得到作用距离 R 随目标降温程度 ΔT_T 的变化曲线,如图 5 所示。其中计算条件为飞行速度 $Ma=1.5$ 。

由图 4 和图 5 可以明显看出,当目标发射率变化范围在 $0.5\sim 0.9$ 时,降低目标表面温度可有效地减小目标与背景的红外辐射对比度和探测系统对目标的作用距离,而且降温程度越大,对比度和作用距离越小,从而红外隐身效果越好。进一步地,同一降温程度下发射率越低,其对比度和作用距离也越小。对比图 4 和图 5,目标表面温度的降低程度对红外辐射对比度和作用距离的影响趋势相同。

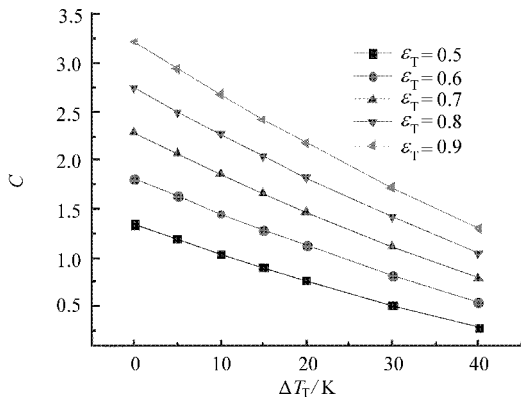


图 4 不同 ϵ_T 下 C 随 ΔT_T 变化曲线
Fig. 4 Relationship between infrared contrast and ΔT_T under different ϵ_T

如飞行高度为 $10\ \text{km}$ 、飞行速度 $Ma=1.5$ 的目标(发射率取 0.7)在 $30.4\ \text{km}$ 的距离可被发现,而当目标表面温度降低 $20\ \text{K}$ 时,在 $26.9\ \text{km}$ 的距离上才被发现,目标可实现 $3.5\ \text{km}$ 左右的隐身,对比度也相应地从 2.28 降到 1.47 。 $Ma=1.5$ 对应的飞行速度为 $1\ 620\ \text{km/h}$, $3.5\ \text{km}$ 意味着飞机在被探测到之前,将多出 $7.8\ \text{s}$ 的进攻时间。

3.2 目标发射率对红外隐身效果的影响

除温度外,对比度参数的另一个重要影响因素是目标发射率 ϵ_T 。图 6 和图 7 分别是 $Ma=1.5$ 的对比度、作用距离与目标发射率的关系曲线。

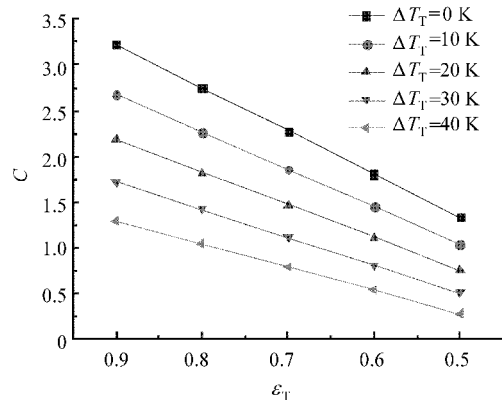
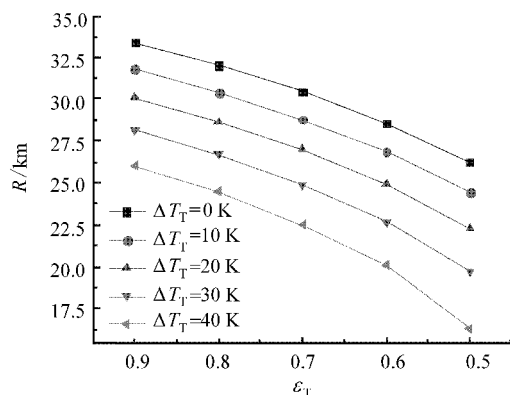


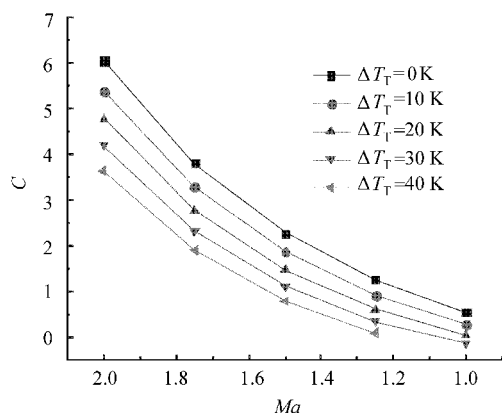
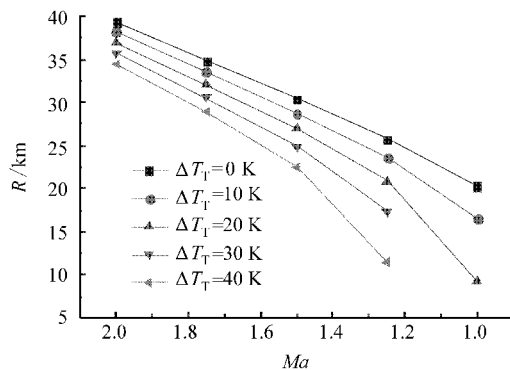
图 6 不同 ΔT_T 下 C 随 ϵ_T 变化曲线
Fig. 6 Relationship between infrared contrast and ϵ_T under different ΔT_T

由图 6 和图 7 可以看出,随着目标发射率的降低,对比度和作用距离都随之减小,红外隐身效果越好;同一发射率下目标降温程度越大,其对比度和作用距离也越小。对比图 6 和图 7,目标发射率的降低对辐射对比度和作用距离的影响趋势相同。

图7 不同 ΔT_T 下 R 随 ε_T 变化曲线Fig. 7 Relationship between operating range and ε_T under different ΔT_T

3.3 飞行速度对红外隐身效果的影响

图8和图9进一步考察不同降温程度下,飞行速度对 C 和 R 的影响。图8是目标发射率 $\varepsilon_T=0.7$ 下飞行马赫数与对比度关系曲线,图9是 $\varepsilon_T=0.7$ 下飞行马赫数与作用距离关系曲线。

图8 不同 ΔT_T 下 C 随 Ma 变化曲线Fig. 8 Relationship between infrared contrast and Ma under different ΔT_T 图9 不同 ΔT_T 下 R 随 Ma 变化曲线Fig. 9 Relationship between operating range and Ma under different ΔT_T

由图8和图9可以看出,随着飞行马赫数的降低,对比度和作用距离都随之减小,红外隐身效果更好。同一飞行马赫数下降温程度越大,对比度和作用距离也越小。比较图8和图9可知,飞行速度的变化对红外辐射对比度和作用距离的影响趋势相同。

4 结论

(1) 针对具体的大气环境,根据相关数据采用指数拟合获得大气透过率 $\tau(R)$ 与作用距离 R 的近似关系表达式,结合作用距离计算公式,使 R 的求解变得简单、快速。

(2) 目标与背景的红外辐射对比度 C 随蒙皮表面温度 T_T 或蒙皮发射率 ε_T 的下降而下降,且当蒙皮降温程度 ΔT_T 在 $0\sim 40$ K 之间、 ε_T 在 $0.5\sim 0.9$ 之间时基本呈线性关系; C 随飞行马赫数 Ma 的下降而下降,当 ΔT_T 在 $0\sim 40$ K 内变化时, C 随 Ma 数呈指数下降。

(3) 探测系统对目标的作用距离 R 随 T_T , ε_T 或 Ma 数的下降而下降,且呈现由线性向抛物线的渐变。

(4) 目标表面温度、目标发射率和飞行速度等对目标与背景的辐射对比度 C 、作用距离 R 的各种影响趋势相同,而且 C 无需校正,没有涉及复杂的大气透过率和热像仪等因素,对于未知环境或 $\tau(R)$ 不易确定的条件, C 可在一定程度上作为描述红外隐身效果的一个简单、快速的参数。 C 越小目标的红外隐身效果越好。

参考文献

- [1] 黄峰,汪岳峰,董伟,等.基于灰度相关的红外隐身效果评价方法研究[J].光子学报,2006,35(6):928-931.
Huang Feng, Wang Yuefeng, Dong Wei, et al. Study on infrared camouflage effect evaluation based on gray correlation[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(6):928-931. (in Chinese)
- [2] 韩玉阁,宣益民.战车红外隐身效果评估方法研究[J].红外技术,2003,25(6):22-24.
Han Yuge, Xuan Yimin. The methodology study for the infrared camouflage effect evaluating of the armored vehicle[J]. Infrared Technology, 2003, 25(6):22-24. (in Chinese)
- [3] 王刚,禹秉熙.基于对比度的空中红外点目标探测距离估计方法[J].光学精密工程,2002,10(3):276-280.
Wang Gang, Yu Bingxi. Approach to estimate infrared point-target detection range against sky background based on contrast[J]. Optics and Precision Engineering, 2002, 10(3):276-280. (in Chinese)

- [4] 武振波,武哲.武装直升机红外隐身系统研究[J].北京航空航天大学学报,2003,29(7):588-592.
Wu Zhenbo, Wu Zhe. Research on infrared stealth system for armed helicopter[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(7): 588-592. (in Chinese)
- [5] 薛晶晶,白廷柱,李国琛.红外隐身材料隐身效果评价方法研究[J].光学技术,2005,31(3):449-451.
Xue Jingjing, Bai Tingzhu, Li Guochen. Study for evaluation of camouflage material effectiveness[J]. Optical Technique, 2005, 31(3): 449-451. (in Chinese)
- [6] 陈翊,袁江涛,杨立.地面目标红外特性及其隐身技术研究[J].工程热物理学报,2007,28(5):844-846.
Chen Xuan, Yuan Jiangtao, Yang Li. The study on infrared characterization and stealthy technology of ground targets[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(5): 844-846. (in Chinese)
- [7] 白长城,张海兴.红外物理[M].北京:电子工业出版社,1989:49-114.
Bai Changcheng, Zhang Haixing. Infrared physics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1989: 49-51. (in Chinese)
- [8] 徐南荣,卞南华.红外辐射与制导[M].北京:国防工业出版社,1997:19-66.
Xu Nanrong, Bian Nanhua. Infrared control and guide[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1997: 19-66. (in Chinese)
- [9] 吴晗平,易新建,杨坤涛.红外搜索系统的作用距离及其等效检验[J].红外技术,2004,26(4):1-5.
Wu Hanping, Yi Xinjian, Yang Kuntao. Active distance and its equivalent test for infrared search system[J]. Infrared Technology, 2004, 26(4): 1-5. (in Chinese)
- [10] 牟达,王建立,陈涛.凝视型红外搜索跟踪系统对高速飞机作用距离的分析[J].光学技术,2007,32(3):420-423.
Mu Da, Wang Jianli, Chen Tao. Analysis on operating range of a staring infrared search and track system for high-speed aircraft[J]. Optical Technique, 2007, 32(3): 420-423. (in Chinese)
- [11] 杨宜禾,岳敏,周维真.红外系统[M].北京:国防工业出版社,1995:145-149.
Yang Yihe, Yue Min, Zhou Weizhen. Infrared system[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995: 145-149. (in Chinese)
- [12] 牟达,王建立,陈涛.红外搜索跟踪系统作用距离的分析[J].仪器仪表学报,2006,27(6):93-95.
Mu Da, Wang Jianli, Chen Tao. Analysis for operating range of IR search and track system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 93-95. (in Chinese)
- [13] 陈衡.红外物理学[M].北京:国防工业出版社,1985:73-76.
Chen Heng. Infrared physics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1985: 73-76. (in Chinese)
- [14] 范绪箕.气动加热与热防护系统[M].北京:科学出版社,2004:38-41.
Fan Xuji. Aerodynamic heating and thermal protection system[M]. Beijing: Science Press, 2004: 38-41. (in Chinese)
- [15] 张孝霖.论红外系统距离方程中大气透过率对距离的影响[J].激光与红外,2006,35(3):168-170.
Zhang Xiaolin. On the atmospheric transmittance τ_a in the range equation of IR systems and the correct solution of range R [J]. Laser and Infrared, 2006, 35(3): 168-170. (in Chinese)

作者简介:

韦第升(1982—)男,博士研究生。主要研究方向:红外隐身效果评价、智能温控系统及复合材料与结构。

Tel: 010-82338827

E-mail: weidisheng@mse.buaa.edu.cn

王小群(1969—)女,博士,副教授。主要研究方向:功能高分子与复合材料、功能材料与器件、红外隐身技术及应用。

E-mail: wangxiaqun@buaa.edu.cn

杜善义(1938—)男,中国工程院院士、教授、博士生导师。主要研究方向:复合材料与结构及其评价、固体力学、航天器结构。

E-mail: sydu@buaa.edu.cn

(责任编辑:李铁柏)